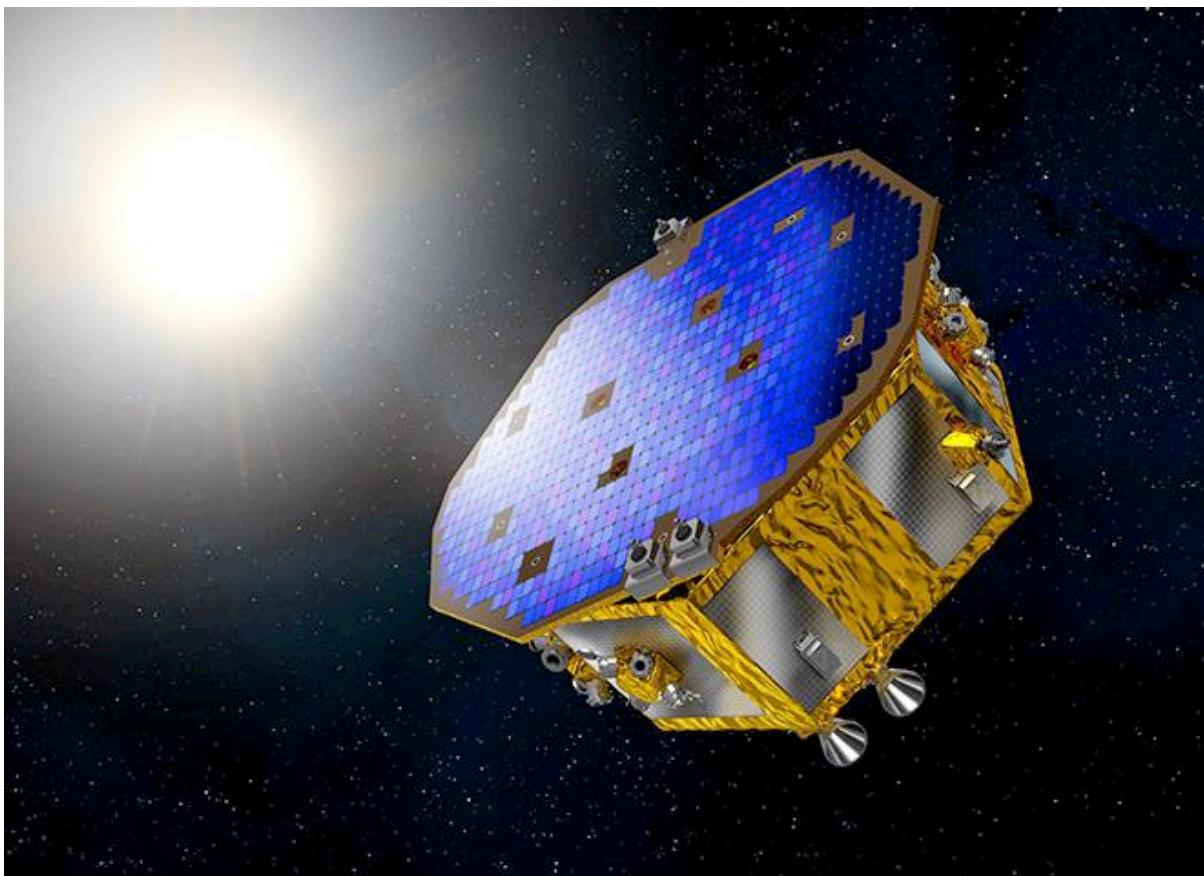


UE Sciences et Systèmes spatiaux

Rapport :

LISA PATHFINDER



BEGHRICHE Asma

PLAN

Introduction.....	p3
I. Mission.....	p4
a. Approche scientifique.....	p4
b. Objectifs.....	p5
II. Technologie.....	p6
a. La LTP.....	p7
b. Le DRS.....	p10
III. Déroulement de la mission.....	p11
a. Lancement.....	p11
b. Mise en orbite.....	p11
c. Début de la mission scientifique.....	p12
Conclusion.....	p12
Bibliographie.....	p13

Introduction

Jusqu'à présent, l'ensemble de l'astronomie consistait à « voir » le rayonnement électromagnétique émis par les particules interstellaires et les astres constituant l'Univers.

Aujourd'hui un autre type d'observation est en cours : « ressentir » les vibrations de la nappe de l'espace-temps, les ondes gravitationnelles, prédictes par la relativité générale d'Einstein.

L'étude de ces vibrations transmettra de nouvelles informations sur le comportement, la structure et l'histoire de l'Univers, et permettra de clarifier plusieurs questions en physique fondamentale.

Plusieurs tentatives d'observation ont eu et ont encore lieu : une équipe internationale avait cru avoir réussi à détecter des ondes gravitationnelles avec le radiotélescope Bicep-2 en Antarctique. Des interféromètres terrestres installés en France et en Italie (Ligo et Virgo) tentent eux aussi, sans succès, une trace d'un passage d'une onde gravitationnelle.

En effet la sensibilité des interféromètres et la courte distance de leurs bras ne permettent pas encore de les détecter.

Le projet eLISA (Evolved Laser Interferometer Space Antenna) est alors mis en place pour détecter ces ondes gravitationnelles, mais dans l'espace, pour s'affranchir des perturbations comme les vibrations sismiques qui viennent compliquer les expériences au sol.

La mission eLISA, prévue pour 2024, pour être réussie, a besoin d'un satellite démonstrateur, le LISA Pathfinder, pour tester les différentes technologies utilisées dans le projet.

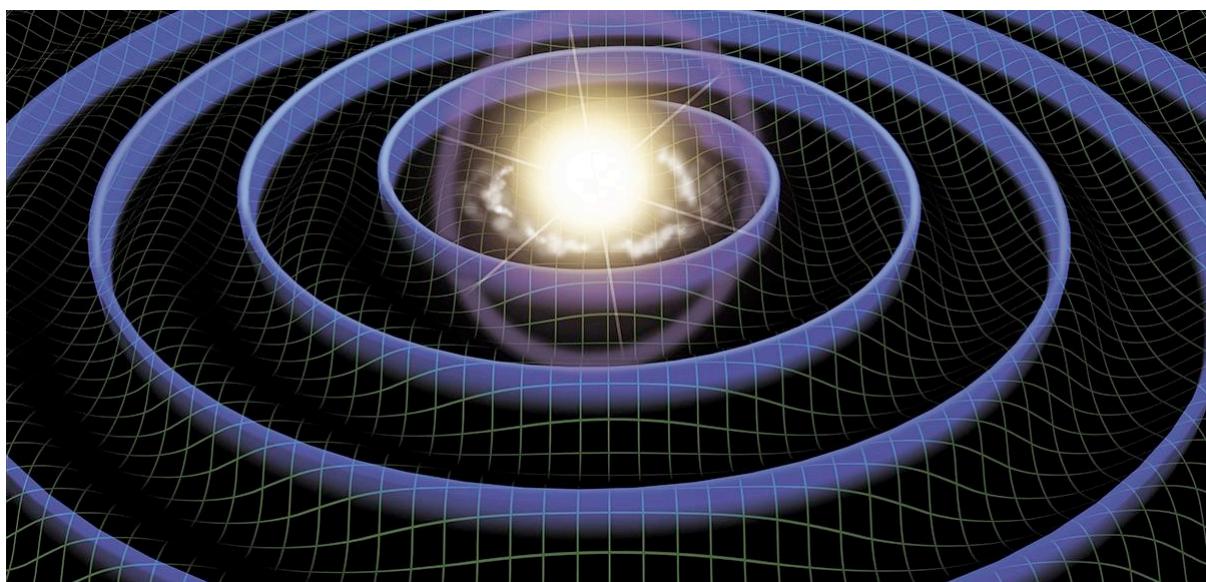
Dans les chapitres suivants sont explicités les objectifs concrets et la technologie de ce satellite démonstrateur.

I. Mission

a. Approche scientifique

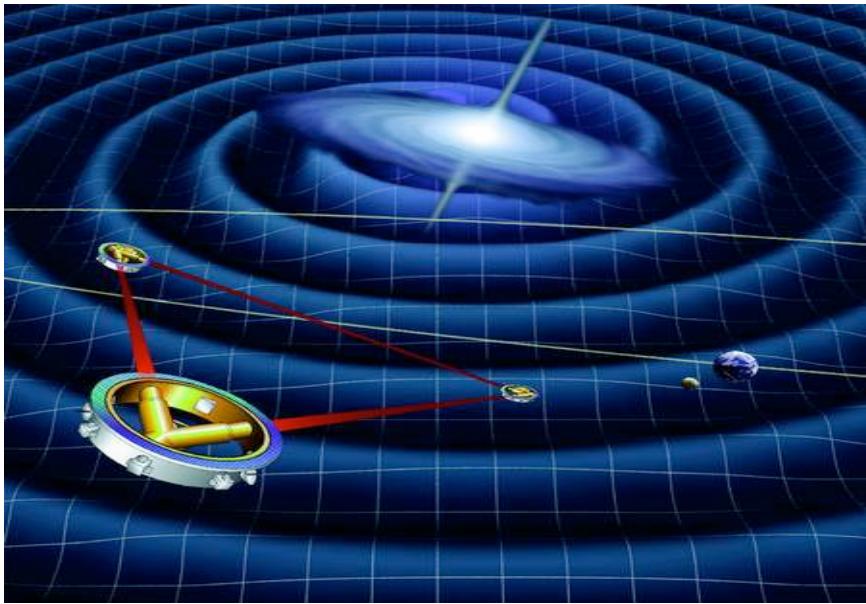
D'après la théorie de la relativité générale, tout objet massif déforme l'espace-temps à son voisinage.

Considérons l'espace-temps comme une géante nappe s'étalant sur tout l'Univers. Lorsque un objet compact très massif se met à tourner, par exemple si une rotation de deux étoiles à neutrons se fait l'une autour de l'autre, ce mouvement créera des vibrations qu'on appelle ondes gravitationnelles qui déformeront la nappe de l'espace-temps.



L'effet de ces ondes est visible par la variation de la distance entre deux objets au passage de cette onde entre ces deux objets. Cependant cette variation est de l'ordre de quelques picomètres, pour une distance de quelques millions de km. Plus la masse de l'objet provoquant les vibrations est élevée, plus la période est grande et la fréquence des ondes produites basse.

Ainsi les interféromètres terrestres Ligo et Virgo effectuent des mesures sur une bande de fréquences correspondant à des étoiles à neutrons ou des trous noirs stellaires (10Hz à 10kHz), tandis que eLISA s'aventure dans une bande de fréquence beaucoup plus basse (0.1mHz à 1Hz) correspondant à la capture d'astres compacts par des trous noirs, voire les coalescences de trous noirs supermassifs.



eLISA est composé de 3 satellites formant un interféromètre de Michelson géant où les deux satellites filles jouent le rôle de miroir et le satellite mère celui de source et d'observateur⁴. Au passage d'une onde gravitationnelle les distances des deux bras (de 1 million de km) de eLISA sont déformées.

Le signal reçu contient donc des informations sur l'origine de l'onde gravitationnelle détectée (colatitude et longitude de la source, phase initiale de l'onde, fréquence, amplitude, inclinaison et polarisation du plan d'orbite de binaires ou de trous noirs supermassifs, distance, âge).

Le principe de détection pour ne pas être perturbé par les autres forces non gravitationnelles telles que le vent solaire et la pression de radiation, est de faire suivre par le satellite deux masses inertielles (cubes de 1.96kg en or et platine de 45mm de côté) en chute libre dans l'espace.

Chaque satellite mesure ces contraintes à l'aide d'un accéléromètre capacitif dont il est doté et compense ainsi ces forces, grâce à des micro-accélérateurs. Ce dispositif assure que chaque satellite reste bien centré par rapport à sa masse d'épreuve.

b. Objectifs

L'objectif de Lisa Pathfinder est de s'assurer que les masses sont bien isolées des perturbations non gravitationnelles comme le vent solaire ou la présence d'un champ électrique résiduel dans le satellite, car une accélération variable de ces masses produirait un signal indissociable de celui produit par la détection d'une onde gravitationnelle. Il représentera ainsi le premier test en vol de la technologie nécessaire à la détection d'ondes gravitationnelles par interférométrie: propulseurs micro-Newton, lasers et optiques.

II. Technologie



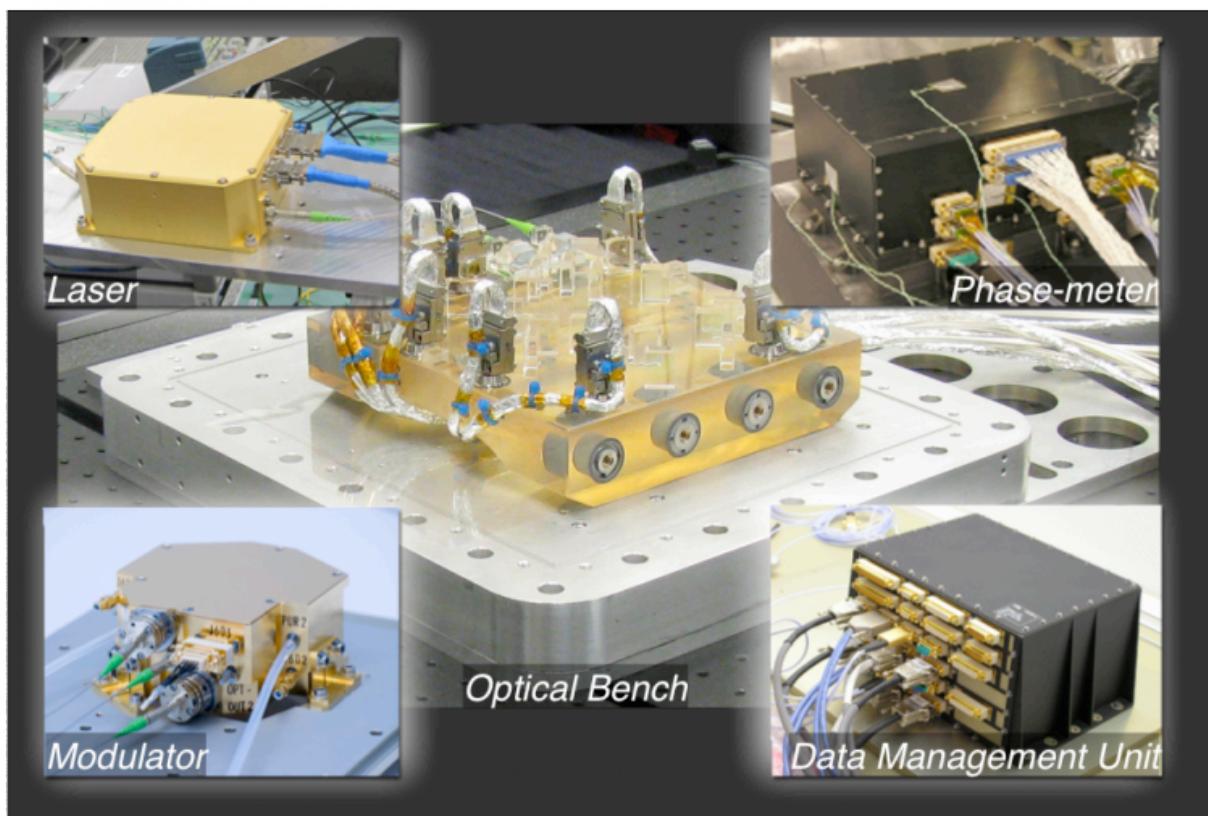
Vue éclatée de LISA-Pathfinder ©ESA/NASA

Le Lisa Pathfinder, lourd de 1900kg, haut de 1m et large de 2,3m , est constitué d'un panneau solaire, un module scientifique (contenant lui-même le Lisa Technology Package détaillé ci-après) et le module de propulsion.

Les deux systèmes principaux :

- La LTP (Lisa Technology Package), technologie de métrologie et de protection des masses, qui a pour objectif de démontrer que l'on est en mesure de maintenir deux masses d'épreuve dans l'espace soumises à un bruit d'accélération relative inférieur à $3.10^{-14} \text{ m.s}^{-2}.\text{Hz}^{-1/2}$ à la fréquence de 1 mHz,
- le DRS (Disturbance Reduction System), système de réduction de perturbation, est un système de contrôle de position du satellite développé par la NASA chargé de compenser toutes les forces s'exerçant sur le satellite autres que celles de la gravité.

a. Le LTP

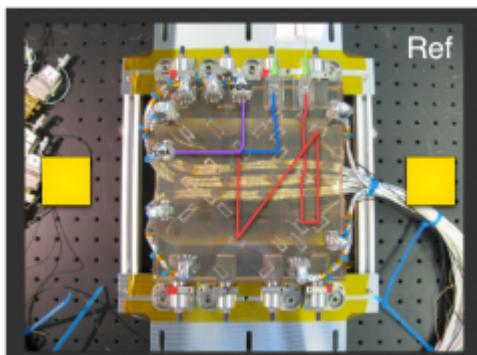


Assemblage laser du système de métrologie optique

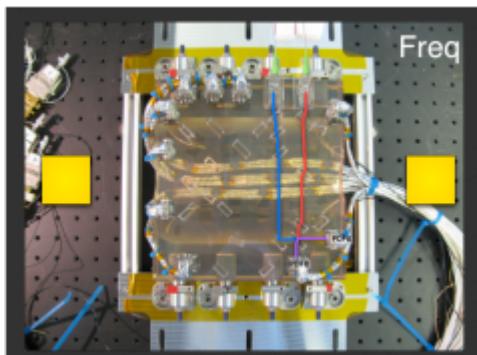
Un laser à fibre Nd: YAG émettant de la lumière à 1064 nm, avec une puissance d'environ 40 mW est couplé à une unité de modulation, qui divise le faisceau en deux parties. Chaque faisceau est décalé en fréquence par un modulateur acousto-optique, une par 80 MHz + 0.5kHz, l'autre par 80MHz - 0.5kHz. La différence entre ces deux modulations (1 kHz) est la fréquence hétérodyne à laquelle les mesures de phase sont effectuées. Les deux faisceaux provenant du modulateur de laser sont ensuite injectés via des fibres optiques sur le banc optique.

Banc optique

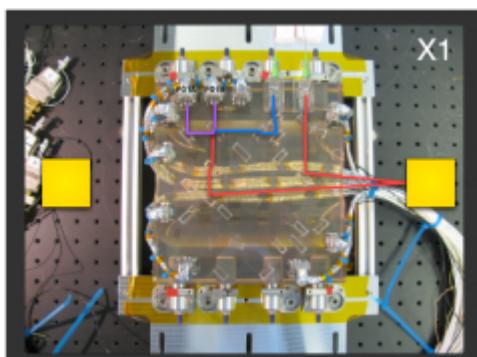
Deux faisceaux laser ayant des fréquences légèrement différentes sont injectés sur le banc optique, où on observe quatre points d'interférence :



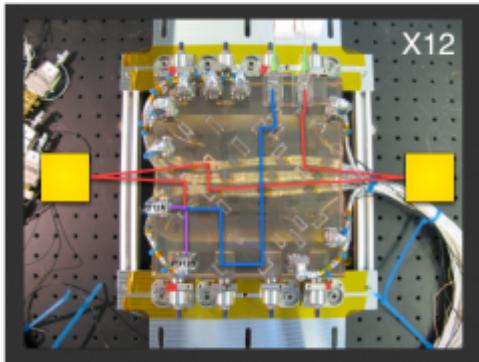
Interféromètre de référence : formé par des trajets optiques qui sont entièrement contenus sur le banc optique et fournissant une mesure de référence stable pour les affichages principaux.



L'interféromètre de fréquence : à nouveau avec des trajets optiques entièrement contenus sur le banc, mais avec des longueurs de bras inégales (provenant de différentes longueurs de fibre d'entrée) pour donner une mesure de la stabilité de fréquence du laser; ceci est alors utilisé pour surveiller ou stabiliser la fréquence du laser.



L'interféromètre X1 : qui a un chemin optique qui comprend l'une des masses-test en chute libre, permettant ainsi une mesure précise du mouvement du banc (et donc du vaisseau spatial) par rapport à la masse d'épreuve.



L'interféromètre X12 : qui a un chemin optique qui comprend deux masses-test en chute libre, et donne une mesure précise du mouvement différentiel des deux masses-test.

Les photodiodes envoient alors des signaux traités par ordinateur après Transformées de Fourier à l'aide d'un phasemètre pour produire des mesures longitudinales et attitude des deux masses d'essai en chute libre.

GRS (système référentiel gravitationnel)

Le GRS est composé des masses-test en chute libre à l'intérieur du boîtier de détecteurs capacitifs et actionneurs d'électrodes. Tout cela est contenu dans le sous-système GRS, composé d'une chambre à vide et du matériel pour la décharge photoélectrique des mass-test et leur maintien en place lors du lancement.

Masses-test

Les masses d'essai de LPF sont des cubes de 75% d'Or et 25% de platine, de 46 mm de côté et de masse totale de 1,97 kg. Leur matériau est un matériau pur et sert également de miroir pour l'interférométrie.

Capteurs et actionneurs capacitifs

Le corps de l'électrode capacitif de capteur contient 6 paires d'électrodes de détection, sans aucun contact mécanique ou électrique de la masse-test. Le mouvement de la masse-test à l'intérieur du boîtier est détecté par 6 circuits en pont capacitif (le reste j'ai pas compris).

Le capteur doit également fournir des forces électrostatiques pour actionner les masses-test. Ceci est obtenu avec des tensions de fréquence audio appliquées aux électrodes de détection.

Le boîtier de l'électrode est supervisé par CGS en Italie, tandis que l'électronique du capteur sont fournis par Oerlikon en Suisse.

Satellite et contrôle des masses-test

Le satellite est contrôlé (à l'aide de propulseurs micronewton) pour maintenir la MT1 dans une position centrée par rapport au satellite. Cette boucle de commande "de traînée" a une bande passante de 100 MHz.

La MT2 est alors commandée par une bande électrostatique de faible largeur de plus ou moins 1 MHz, pour suivre la MT1.

Tous les autres degrés de liberté seront contrôlés avec une combinaison des propulseurs de satellites et la suspension électrostatique, en utilisant l'interférométrie, détecteurs capacitifs, et suiveurs stellaires.

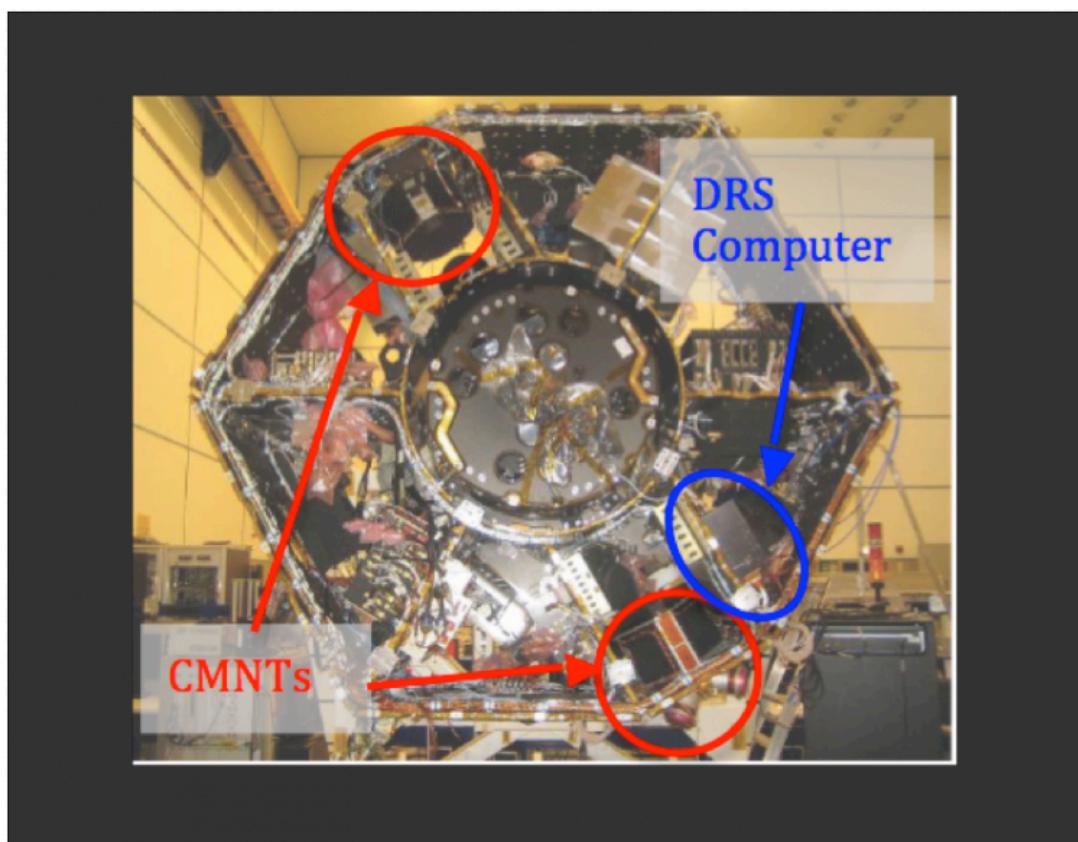
b. Le DRS

Propulseur micro-newton colloidal

Le propulseur micro-newton colloidal permet d'atteindre des niveaux de poussée de quelques micro-Newton. Il génère une poussée par la charge de petites gouttes de liquide en les accélérant à travers un champ électrique.

Contrôle DRS

Le système de réduction de perturbation ST7 (DRS) décrit la position relative des masses test et l'engin spatial et des « suiveurs » stellaires de LPF décrivant l'attitude de l'engin spatial. Il calcule ensuite les forces et couples appropriés à appliquer à l'engin spatial (via les CMNTs) et les masses test (via le LTP). Les lois de contrôle ST7-DRS ont été développées au Goddard Space Flight Center de la NASA et mises en œuvre pour le vol au Jet Propulsion Laboratory de la NASA.

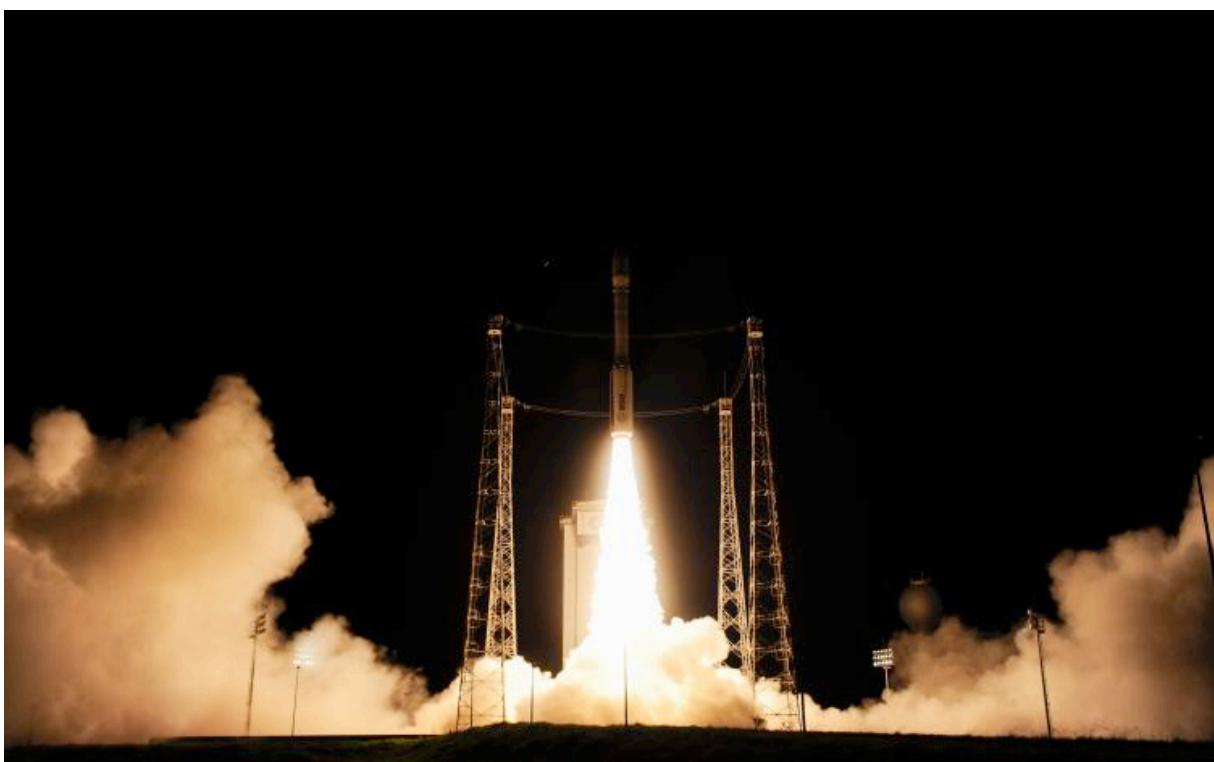


III. Déroulement de la mission

a. Lancement

Le satellite a été lancé avec succès le 3 décembre 2015 à 4h04 GMT, sur la base de lancement de Kourou en Guyane, avec le lanceur européen VEGA VV06, sur une orbite basse elliptique de demi-grand axe 7,252 km, d'excentricité 0,0919, avec une inclinaison de 5,956°.

Il s'est séparé du lanceur 105 minutes plus tard et ses premiers signaux ont été reçus par les contrôleurs de l'ESOC (European Space Operations Centre) à Darmstadt en Allemagne.



b. Mise en orbite

Le satellite doit atteindre son orbite au point de Lagrange L1, situé à 1,5 million de km.

Pendant une semaine, le module de propulsion de Lisa Pathfinder allume son moteur principal au périgée pour chaque poussée permettant l'élévation de l'orbite.

Le module de propulsion de LISAPathfinder allume son moteur principal pour la sixième poussée qui permet d'échapper à la l'attraction terrestre et de se mettre sur la trajectoire vers le point de Lagrange L1, puis a lieu une manoeuvre de correction de trajectoire pour corriger les erreurs de la poussée d'éjection. Le satellite est actuellement en orbite pour atteindre le point de Lagrange L1, arrivée estimée le 22 janvier 2016.

c. Début de la mission scientifique

Après l'éjection du module de propulsion, environ 24 s'écouleront jusqu'à ce que débute la mission pendant 6 mois :

Les deux masses étalons seront libérées par un mécanisme de déverrouillage puis maintenues en position grâce à un faible champ électrostatique contrôlé. Une fois le mode scientifique de la mission enclenché, le champ électrostatique est désactivé et les masses entrent en chute libre au milieu des électrodes. Le satellite obéit ensuite à un système de contrôle d'attitude et de compensation de traînées pour suivre la masse étalon.

L'interféromètre laser et les capteurs électrostatiques enregistreront le déplacement des masses étalons dans le satellite, et mesureront la position relative et l'orientation des deux masses étalons séparées de 36cm, avec une très grande précision.

Conclusion

La science de la LISA Pathfinder consiste à mesurer et créer un modèle physique expérimental ancré pour tous les effets parasites qui limitent notre capacité à créer et mesurer la constellation parfaite de particules d'essai en chute libre qui serait idéal pour Elisa.

Si Lisa Pathfinder est un succès, eLISA pourra commencer sa mission en 2024. Elisa donnera une occasion unique d'observer les trous noirs supermassifs de l'Univers.

Aussi, grâce à la relativité générale, elle sera capable d'obtenir des informations remontant jusqu'à la naissance de l'Univers.

La voie des coalescences de trous noirs et des fusions galactiques sera éclairée, et tester l'hypothèse au cœur de la formation des galaxies, c-a-d leur assemblage en mode bottom-up.

Bibliographie

Sites Web consultés :

- https://fr.wikipedia.org/wiki/LISA_Pathfinder
- <https://www.elisascience.org>
- <http://www.arianespace.com/mission-update/the-sixth-vega-success-supports-european-science-with-launch-of-the-lisa-pathfinder-space-probe/>

Articles consultés :

- <https://www.elisascience.org/files/publications/1201.3621v1.pdf>
- <https://lejournal.cnrs.fr/articles/a-la-poursuite-des-ondes-gravitationnelles>
- <http://www.space-airbusds.com/fr/programmes/lisa-pathfinder-lg9.html>
- <http://www.futura-sciences.com/magazines/espace/infos/actu/d/onde-gravitationnelle-lisa-pathfinder-ouvre-chasse-spatiale-ondes-gravitationnelles-59929/>
- <http://reves-d-espace.com/2015/12/03/lisa-pathfinder-lancement-reussi-par-vega-vv06/>